СТРАТЕГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТРАНСФОРМАЦІЙНИХ ЗМІН МІЖГАЛУЗЕВОЇ ВЗАЄМОДІЇ В УМОВАХ ВИКОНАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ЗІ СКОРОЧЕННЯ ЕМІСІЙ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

д. т. н. ***Кудін В. І.,***
д. е. н. ***Онищенко А. М.***

Україна, Київ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ARTICLE INFO

Received 23 January 2018
Accepted 20 February 2018
Published 15 March 2018

KEYWORDS

sustainable development,
the Paris Agreement,
ecological and economic system,
Leontief "input-output" model,
Leontief-Ford "input-output" model,
simulation

ABSTRACT

Prospective analysis of contemporary both theoretical and practical economy growing trend demonstrates account social factors and life support on Earth on a global scale. It is expected that in the near future this trend will occupy a major position in the global economy and will significantly determine the international economic relations. At the forefront of a globalizing world economy and international economic relations serves full priority to ensure the future world society. In the article is proposed a modified balance ecological and economic "input-output" model, which is based on established by the Paris Agreement limits on greenhouse gas emissions. It is determinated the conditions for the existence of the productivity model, which provides non-negativity of the economic and environmental performance. It is offered the mathematical apparatus of determining the change in the volume of gross output of primary and secondary production in the event of changes in the sector structure.

Вступ. В сучасних умовах глобалізації світової економіки і світових економічних зв'язків на перший план виступає пріоритет забезпечення повноцінного майбутнього світового суспільства. В контексті цього значно зростає врахування екологічного фактору в макроекономіці і особливим чином постає специфічна проблема ролі, місця та організації екологічної складової. Відповідно особливої актуальності набуває розробка нового концептуального підходу до екологічного ресурсу як сучасної економічної категорії, врахування якої необхідно буде зводити до розробки нової концепції екологічної економіки, світових економічних зв'язків, пошуку оптимальних шляхів міждержавної співпраці в питаннях охорони довкілля, ресурсозбереження та маловідходних технологій.

Реакцією міжнародної спільноти на проблеми негативного впливу зміни клімату на соціально-економічний розвиток стало прийняття Організацією Об'єднаних Націй Паризької угоди з захисту клімату, яка зокрема спрямована на зменшення емісій парникових газів у глобальному вимірі [1].

Реалізація положень Паризької угоди потребує залучення вчених різних наукових напрямів з метою поєднання їх досвіду в рамках міждисциплінарного дослідження. Особливої уваги серед них заслуговує економічна складова, як основний принцип розв'язання екологічних проблем – економічне заохочення. Економіка міжнародної угоди вимагає комплексного, системного підходу до її вивчення. Дотримуючись загальної методології дослідження економічних процесів, необхідно розглянути концептуальний рівень основних засад даної угоди, окреслити основних фігурантів – економічних агентів, еколого-економічні показники, з'ясувати існуючі між ними зв'язки, їх природу та специфіку. Подальшим кроком проведення дослідження повинен стати перехід до рівня математичного моделювання еколого-економічної взаємодії як ефективного інструменту наукового пізнання.

Результати дослідження. В роботі [2] запропоновано враховувати витрати на виконання емісійних обмежень парникових газів у структурі галузей основного виробництва у вигляді:

$$\begin{cases} x_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + Cy_2 + y_1, \\ x_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 - y_2, \end{cases} \tag{1}$$

де $x_1 = \left(x_1^1, x_2^1, \ldots, x_n^1\right)^T$ – вектор-стовпчик об'ємів виробництва продукції;

$x_2 = \left(x_1^2, x_2^2, \ldots, x_m^2\right)^T$ – вектор-стовпчик об'ємів знищених забруднюючих речовин;

$y_1 = \left(y_1^1, y_2^1, \ldots, y_n^1\right)^T$ – вектор-стовпчик об'ємів кінцевої продукції;

$y_2 = \left(y_1^2, y_2^2, \ldots, y_m^2\right)^T$ – вектор-стовпчик об'ємів незнищених забруднень;

$A_{11} = \left(a_{ij}^{11}\right)_1^n$ – квадратна матриця коефіцієнтів прямих витрат продукції i на виробництво одиниці продукції j;

$A_{12} = \left(a_{ig}^{12}\right)_{i,g=1}^{n,m}$ – прямокутна матриця витрат продукції i на одиницю знищення забруднювачів g;

$A_{21} = \left(a_{kj}^{21}\right)_{k,j=1}^{m,n}$ – прямокутна матриця випуску забруднювачів k на одиницю виготовленої продукції j;

$A_{22} = \left(a_{kg}^{22}\right)_1^m$ – квадратна матриця випуску забруднювачів k на одиницю знищення забруднювачів g.

Cy_2 – витрати, пов'язані з викидами парникових газів (тобто витрати на обслуговування викидів парникових газів, зокрема, це плата за дозволи на викиди);

$C = \left(c_{ig}^{12}\right)_{i,g=1}^{n,m}$ – прямокутна матриця витрат продукції i на одиницю викидів забруднювача g.

В системі (1) неявно припускається, що коефіцієнти $a_{ij}^{11} \geq 0$, $a_{ig}^{12} \geq 0$, $a_{kj}^{21} \geq 0$, $a_{kg}^{22} \geq 0$ розповсюджують на всі види виробничої діяльності (матеріальне виробництво та знищення забруднювачів) гіпотези основної моделі міжгалузевого балансу: кількість технологічних способів дорівнює кількості видів продукції та в кожному технологічному способі виробляється лише один вид продукції. В подальшому будемо вважати матриці A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22} невід'ємними: $A_{11} \geq 0$, $A_{12} \geq 0$, $A_{21} \geq 0$, $A_{22} \geq 0$. Економічний зміст моделі (1) вимагає, щоб всі її змінні були невід'ємними, тобто, $x_i^1 \geq 0$, $x_k^2 \geq 0$, $y_i^1 \geq 0$, $y_k^2 \geq 0$.

У векторно-матричному вигляді модель (1) можна представити так:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_1 & C \\ 0 & -E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \tag{2}$$

де E_1 та E_2 – відповідні одиничні діагональні матриці.

Перше рівняння запропонованої моделі відображає економічний баланс – розподіл галузевого валового випуску продукції на виробниче споживання основного та допоміжного виробництв, кінцеве споживання основного виробництва та витрати, пов'язані з виконанням зобов'язань за Паризькою угодою. Друге рівняння відображає фізичний баланс парникових газів, як суму емісій, спричинених діяльністю основного та допоміжного виробництв, та їх незнищених обсягів.

Функціонування будь-якої виробничої одиниці – це зазвичай цілеспрямований процес, який можна представити як систему з певним входом і виходом, що перетворює вхідні матеріали на кінцевий продукт діяльності. В такій ситуації стан виробничої системи визначається сукупністю умов і засобів, що забезпечують її існування. Для процесу виробництва продукції – головного процесу економічної системи – входом слугують поставки сировини, матеріалів, комплектуючих виробів, обладнання, трудових і фінансових ресурсів, вихід визначається виробленою продукцією, а стан – накопиченими запасами засобів виробництва і трудових ресурсів. Один із основних методологічних принципів системного аналізу економічної діяльності полягає в можливості адекватного визначення входу, виходу і стану кожного з досліджуваних процесів і визначенні схеми їх взаємодії. Реальний існуючий спосіб виробництва визначається, з одного боку, прагненням до оптимального використання задіяних технологій, з іншого – обмеженими можливостями забезпечення виробничими факторами. Обмеження останнього роду пов'язані зі сформованими тенденціями в розвитку виробництва, розмірами виробничих потужностей, кваліфікаційним складом виробників, а також із суто економічними обмеженнями таких показників, як термін окупності капіталовкладень, матеріалоємність продукції тощо. По суті, обмеження певного способу виробництва викликані двома основними причинами: неможливістю за короткий строк змінити склад і структуру виробничих ресурсів; умовами, що накладені зовнішнім середовищем.

На сучасному етапі розвитку еколого-економічних відносин все більш важливу роль відіграють організаційно-економічні аспекти, які накладають обмеження на можливості реалізації оптимального способу виробництва в умовах дії Паризької угоди. Отже, якщо відомі кількість і склад виробничих факторів, технологічних способів і організаційно-економічні обмеження, то на підставі цих даних актуальним завданням є визначення зміни об'єму і структури випуску в трансформаційних змінах зовнішнього середовища.

Розглянемо задачу визначення як зміняться вектори валового випуску та об'ємів утилізації парникових газів, якщо змінити коефіцієнти технологічних матриць, зокрема при посиленні екологічних стандартів та необхідності збільшення витрат на виконання зобов'язань за Паризькою угодою. Наприклад, припустимо, що зміни зазнають елементи однієї або кількох технологічних матриць A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}, C.

Визначимо як така зміна впливає на значення векторів x_1 та x_2. Для цього використаємо процедуру, запропоновану в математичній літературі з матричного аналізу [3].

Модель (2) можемо представити у вигляді:

$$Au = G \tag{3}$$

де $A = \begin{pmatrix} E_1 - A_{11} & -A_{12} \\ -A_{21} & E_2 - A_{22} \end{pmatrix}$, $u = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ – $(n+m)$ - вимірний вектор, $G = \begin{pmatrix} E_1 & C \\ 0 & -E_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$, E_1, E_2 – блочні одиничні матриці відповідної розмірності, 0 – блочна нульова матриця.

Будемо також розглядати систему, збурену (в елементах матриць A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22} та вектора- стовпця G) по відношенню до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (3) вигляду:

$$\overline{A}u = \overline{G} \tag{4}$$

де $\overline{A}$, $\overline{G}$ – відповідні збурена матриця та вектор-стовпець. Нехай для системи (3) знайдено опорний розв′язок та обернену матрицю. Тоді має місце наступна теорема (детальніше в [4]).

Теорема 1. Між коефіцієнтами розвинення векторів-нормалей обмежень за рядками базисної матриці, елементами обернених матриць, базисними розв'язками, нев'язками обмежень в двох суміжних базисних розв'язках відповідно мають місце такі співвідношення:

$$\overline{\alpha}_{rk} = \frac{\alpha_{rk}}{\alpha_{lk}},\ \overline{\alpha}_{ri} = \alpha_{ri} - \frac{\alpha_{rk}}{\alpha_{lk}}\alpha_{li},\ r = \overline{1, n+m},\ i = \overline{1, n+m},\ i \neq k\ . \tag{5}$$

$$\overline{e}_{rk} = \frac{e_{rk}}{\alpha_{lk}},\ \overline{e}_{ri} = e_{ri} - \frac{e_{rk}}{\alpha_{lk}}\alpha_{li},\ r = \overline{1, n+m},\ i = \overline{1, n+m},\ i \neq k\ . \tag{6}$$

$$\overline{u}_{0j} = u_{0j} - \frac{e_{jk}}{\alpha_{lk}}\Delta_l,\ j = \overline{1, n+m}\ . \tag{7}$$

$$\overline{\Delta}_k = -\frac{\Delta_l}{\alpha_{lk}},\ \overline{\Delta}_r = \Delta_r - \frac{\alpha_{rk}}{\alpha_{lk}}\Delta_l,\ r = \overline{1, n+m},\ r \neq k\ . \tag{8}$$

При цьому умовою опорності базисної матриці при вводі вектору нормалі a_l обмеження $a_l u \le g_l$ на k -у позицію базисної матриці A є виконання нерівності $\alpha_{lk} \neq 0$.

На основі приведених співвідношень можна побудувати алгоритмічну схему дослідження систем (4) (при змінах в моделі). Алгоритм буде ґрунтуватись на ідеології симплекс-методу, з деякими особливостями організації ітераційного процесу. Зокрема, перехід від системи (3) до системи (4) буде проводитись послідовним заміщенням відповідних збурених рядків $i, i+1, i+2, ..., i+i_0$. Це означає, що вектори нормалей гіперплощин, які утворюють рядки базисної матриці та відповідної їй оберненої матриці, будуть заміщатись відповідними "збуреними" векторами-нормалями. На основі симплексних співвідношень (5)-(8) будуть перераховуватись наступні олорні розв′язки та обернені матриці. При збереженні властивості опорності, на ітераціях заміщення, розв′язок системи (4) буде знайдено за i_0 ітерацій. В результаті отримуємо новий базисний розв′язок та обернену матрицю (без перерозв'язання зміненої задачі (4) спочатку).

Формули (5)-(8) можуть бути покладені в основу алгоритму визначення нового розв'язку у випадку збурення елементів базисної матриці, що дозволяє визначати зміни в обсягах валового випуску при зміні технологічних матриць еколого-економічної моделі (2).

Крок 1. Знаходимо розв'язок u_0 вихідної системи (3) та її обернену матрицю A^{-1}.

Крок 2. Якщо збурюємо матрицю A в елементі a_{kj}, то тоді $\overline{a}_{kj} = a_{kj} + a'_{kj}$.

Крок 3. Визначаємо коефіцієнт $\overline{\alpha}_{kk} = 1 + a'_{kj} \cdot e_{jk} \neq 0$, де e_{jk} – відповідний елемент матриці A^{-1}.

Крок 4. Знаходимо новий вектор-стовпець $\overline{e}_k = \dfrac{e_k}{\alpha_{kk}}$ матриці оберненої до $\overline{A}$.

Крок 5. Визначаємо нев'язку збуреного рядка в елементі a'_{kj}: $\Delta_l = \overline{\Delta}_k = a'_{kj} \cdot u_{0j}$, де u_{0j} – j -та компонента u_0.

Крок 6. Знаходимо новий розв'язок на основі співвідношення $\overline{u}_0 = u_0 - \overline{e}_k \cdot \Delta_l$.

Проілюструємо запропонований алгоритм визначення об'ємів валового галузевого випуску у випадку технологічних міжгалузевих змін на умовних даних. Нехай коефіцієнти технологічних матриць еколого-економічної моделі (3) мають такі значення:

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 \end{pmatrix},\ A_{12} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 \end{pmatrix},\ A_{21} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.2 & 0.3 \end{pmatrix},\ A_{22} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.3 & 0.1 \end{pmatrix},$$

матриця витрат на обслуговування емісій парникових газів та вектори галузевого кінцевого випуску і обмеження за викидами парникових газів відповідно:

$$C = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.5 \end{pmatrix},\ y_1 = \begin{pmatrix} 12 \\ 23 \end{pmatrix},\ y_2 = \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \end{pmatrix}.$$

Перевіримо виконання умови продуктивності для еколого-економічної системи у випадку обраних числових даних.

Переходимо до покрокової реалізації алгоритму 1-6.

1. Знаходимо розв'язок вихідної системи та обернену блочну технологічну матрицю:

$$u_0 = \begin{pmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{pmatrix},\ A^{-1} = \begin{pmatrix} 1.79 & 0.73 & 0.6 & 0.76 \\ 1.08 & 2.0 & 0.74 & 0.93 \\ 1.04 & 1.32 & 1.99 & 1.19 \\ 1.1 & 1.27 & 1.04 & 1.99 \end{pmatrix}.$$

2. Припускаємо, що збурення в моделі (3) зазнає елемент $a_{21}^{11} = 0.3$, а саме збільшується на 0.1. Останнє означає збільшення витрат продукції 2-ої галузі на одиницю випуску 1-ої галузі. Отже, $\overline{a}_{21} = 0.3 + 0.1 = 0.4$.

3. Знаходимо $\alpha_{lk} = \overline{\alpha}_{kk} = 1 + 0.1 \cdot a_{12}^{-1} = 1 + 0.1 \cdot 0.74 = 1.074$.

4. Визначаємо вектор-стовпець: $\overline{e}_2 = \begin{pmatrix} 0.73 \\ 2.0 \\ 1.32 \\ 1.27 \end{pmatrix} / 1.074 = \begin{pmatrix} 0.68 \\ 1.86 \\ 1.23 \\ 1.18 \end{pmatrix}$.

5. Розраховуємо нев'язку збуреного рядка: $\Delta_l = \overline{\Delta}_2 = 0.1 \cdot 38.17 = 3.817$.

6. Новий розв'язок отримуємо у вигляді: $\overline{u}_0 = \begin{pmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{pmatrix} - 3.817 \cdot \begin{pmatrix} 0.68 \\ 1.86 \\ 1.23 \\ 1.18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 35.57 \\ 53.33 \\ 27.97 \\ 26.12 \end{pmatrix}$.

Аналіз отриманого розв'язку дозволяє зробити такі висновки. Збільшення витрат продукції 2-ої галузі на одиницю випуску 1-ої галузі в рамках балансової еколого-економічної системи (2) призводить до зменшення обсягів валового випуску 1-ї та 2-ї галузей матеріального виробництва на 2,6 та 7,1 умовних одиниць, а також обсягів утилізації парникових газів 1-го та 2-го виду на 4,7 та 4,5 умовних одиниць відповідно.

Запропонуємо застосування (5)-(8) для побудови методу оцінки трансформації виробничої структури в моделі (2) за умов зміни рядка технологічної матриці.

Результатом конкретизації наведеної технології є алгоритм визначення нового розв'язку у випадку збурення рядків базисної матриці для конкретного рядка обмежень (3), що дозволяє визначати зміни в обсягах валового випуску при зміні технологічних матриць еколого-економічної моделі (2).

Алгоритм.

Крок 1. Знаходимо розв'язок u_0 вихідної системи (3) та її обернену матрицю A^{-1}.

Крок 2. Збурюємо матрицю A в елементах 1-го рядка у вигляді $\overline{a}_i = a_i + a_i'$, $\overline{g}_i = g_i + g_i'$, $i = 1$.

Крок 3. Визначаємо коефіцієнт $\overline{\alpha}_{kk} = a_k e_k + a_k^{'} e_k = 1 + a_k^{'} e_k$, де e_k – стовпець матриці A^{-1}.

Крок 4. Визначаємо $\overline{\Delta}_k = \left(a_k + a_k'\right) \cdot u_0 - \left(g_k + g_k'\right) = \left(a_k \cdot u_0 - g_k\right) + \left(a_k' \cdot u_0 - g_k'\right) = \Delta_k + \Delta_k' = \Delta_k'$

Крок 5. Знаходимо $\lambda = -\overline{\Delta}_k / \overline{\alpha}_{kk}$.

Крок 6. Знаходимо новий вектор-стовпець $\overline{e}_k = \lambda \times e_k$.

Крок 7. Формуємо новий розв'язок на основі співвідношення $\overline{u}_0 = u_0 + \overline{e}_k$.

Зауваження. Неважко переконатись, що новий розв'язок (збуреної задачі) формується на основі старого розв'язку та вразуванні впливу вектору-стовпця оберненої матриці e_k та параметру $\lambda = -\overline{\Delta}_k / \overline{\alpha}_{kk}$. "Вибором" стовпця оберненої матриці e_k та параметру λ (напрям та розтяг відповідного вектора) можна формувати певні результуючі домінанти, тобто проводити зміни направлено та передбачувано.

Проілюструємо запропонований алгоритм визначення об'ємів валового галузевого випуску у випадку технологічних міжгалузевих змін на умовних даних. Нехай коефіцієнти технологічних матриць еколого-економічної моделі (3) мають такі значення:

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 \end{pmatrix},\ A_{12} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 \end{pmatrix},\ A_{21} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.2 & 0.3 \end{pmatrix},\ A_{22} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.3 & 0.1 \end{pmatrix},$$

матриця витрат на обслуговування емісій парникових газів та вектори галузевого кінцевого випуску і обмеження за викидами парникових газів відповідно:

$$C = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.5 \end{pmatrix},\ y_1 = \begin{pmatrix} 12 \\ 23 \end{pmatrix},\ y_2 = \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \end{pmatrix}.$$

Переходимо до покрокової реалізації алгоритму 1-6.

1. Знаходимо розв'язок вихідної системи, та обернену блочну технологічну матрицю:

$$u_0 = \begin{pmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{pmatrix}, \; A^{-1} = \begin{pmatrix} 1.79 & 0.73 & 0.6 & 0.76 \\ 1.08 & 2.0 & 0.74 & 0.93 \\ 1.04 & 1.32 & 1.99 & 1.19 \\ 1.1 & 1.27 & 1.04 & 1.99 \end{pmatrix}.$$

2. Припускаємо, що збурення в моделі (3) зазнає перший рядок, тобто збурена матриця набуває вигляду:

$$\overline{A} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.05 & 0.3 & 0.3 \\ 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.3 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix}.$$

Прикладний зміст зміни еколого-економічних показників такий: зазнають зменшення коефіцієнт витрат 1-ї галузі на одиницю виготовлення продукції 1-ї галузі на 0.1 одиниць, коефіцієнт витрат 1-ї галузі на одиницю виготовлення продукції 2-ї галузі на 0.05 одиниць відповідно; зазнають збільшення коефіцієнт витрат 1-ї галузі на знищення 1-го виду забруднень на 0.2 одиниць, коефіцієнт витрат 1-ї галузі на знищення 2-го виду забруднень на 0.1 одиниць відповідно.

3. Визначаємо скалярний добуток збуреного рядка та розв'язку вихідної системи:

$$\overline{a}_k \cdot u_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.05 & 0.3 & 0.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{bmatrix} = 25.83$$

4. Визначаємо добуток вихідної технологічної матриці та вихідного розв'язку і обраховуємо нев'язку збуреного рядка Δ:

$$a_k \cdot u_0 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{bmatrix} = 23.068$$

$$\overline{\Delta}_k = \overline{a}_k \cdot u_0 - a_k \cdot u_0 = 25.83 - 23.068 = 2.7575$$

5. Визначаємо коефіцієнти $\overline{\alpha}_{kk}$, λ:

$$\overline{\alpha}_{kk} = \overline{a}_k \cdot e_k = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.05 & 0.3 & 0.3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1.79 \\ 1.08 \\ 1.04 \\ 1.1 \end{bmatrix} = 0.875, \; \lambda = -\frac{\overline{\Delta}_k}{\overline{\alpha}_{kk}} = -\frac{2.7575}{0.875} = -3.15$$

6. Визначаємо коефіцієнт $\overline{e}_k$:

$$\overline{e}_k = \lambda \cdot e_k = -3.15 \cdot \begin{bmatrix} 1.79 \\ 1.08 \\ 1.04 \\ 1.1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.64 \\ -3.4 \\ -3.28 \\ -3.47 \end{bmatrix}$$

7. Визначаємо розв'язок збуреної системи $\overline{u}_0$:

згідно формули $\overline{u}_0 = u_0 + \overline{e}_k$ $\overline{u}_0 = u_0 + \overline{e}_k = \begin{bmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -5.64 \\ -3.4 \\ -3.28 \\ -3.47 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 32.53 \\ 57.03 \\ 29.39 \\ 27.15 \end{bmatrix}$.

Проведемо дослідження впливу змін k-го стовпця матриці обмежень A у вигляді $\overline{A}_k = A_k + A_k^{'}$ на розв'язок u_0, де $A_k = (a_{1k}, a_{2k}, ..., a_{mk})^T$, $A_k^{'} = (a_{1k}^{'}, a_{2k}^{'}, ..., a_{mk}^{'})^T$, тобто в такій формі замінено A на $\overline{A}$.

Алгоритм

1. Маємо відомі вектор $u_0 = (u_{01}, u_{02}, ..., u_{0m})^T$, A_b, A_b^{-1} - пряму та обернену базисну матрицю (3).

2. Нехай проводимо заміщення k-го стовпця матриці обмежень A_k стовпцем $\overline{A}_k$ Знаходимо вектор $\overline{L}_k = (L_{k1}, L_{k2}^{'}, ..., L_{km}) = A_b^{-1} \times \overline{A}_k$.

3. Формуємо новий розв'язок $\overline{u}_{0k} = \dfrac{u_{0k}}{1 + (A_b^{-1})_k \times A_k^{'}} = \dfrac{u_{0k}}{\overline{L}_{kk}}$, $i = k$.

$$\overline{u}_{0i} = u_{0i} - \frac{u_{0k}}{1 + (A_b^{-1})_k \times A_k^{'}} \times \left[(A_b^{-1})_i \times A_k^{'} \right] = u_{0i} - \frac{u_{0k}}{\overline{L}_{kk}} \times \overline{L}_{ki},\ i \neq k.$$

Проілюструємо запропонований алгоритм визначення об'ємів валового галузевого випуску у випадку технологічних міжгалузевих змін на умовних даних. Нехай коефіцієнти технологічних матриць еколого-економічної моделі (2) мають такі значення:

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 \end{pmatrix},\ A_{12} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 \end{pmatrix},\ A_{21} = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.3 \\ 0.2 & 0.3 \end{pmatrix},\ A_{22} = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.3 \\ 0.3 & 0.1 \end{pmatrix},$$

матриця витрат на обслуговування емісій парникових газів та вектори галузевого кінцевого випуску і обмеження за викидами парникових газів відповідно:

$$C = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.5 \end{pmatrix},\ y_1 = \begin{pmatrix} 12 \\ 23 \end{pmatrix},\ y_2 = \begin{pmatrix} 5 \\ 8 \end{pmatrix}.$$

1. Знаходимо розв'язок вихідної системи (4) та обернену блочну технологічну матрицю:

$$u_0 = \begin{pmatrix} 38.17 \\ 60.43 \\ 32.67 \\ 30.62 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.2 \\ 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.3 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix},\ A^{-1} = A_b^{-1} = \begin{pmatrix} 1.25 & 3.125 & -3.125 & 0.625 \\ -11.25 & 6.875 & 3.125 & -0.625 \\ 8.75 & -8.125 & -1.875 & 4.375 \\ 5.0 & -2.5 & 2.5 & -2.5 \end{pmatrix}.$$

2. Припускаємо, що збурення в моделі (3) зазнає третій стовпець ($k=3$): проводимо заміщення k -го стовпця матриці обмежень $A_3=\begin{pmatrix}0.1\\0.1\\0.2\\0.3\end{pmatrix}$ стовпцем $\overline{A}_3=\begin{pmatrix}0.2\\0.2\\0.1\\0.1\end{pmatrix}$. Знаходимо вектор $\overline{L}_k=(L_{k1},L'_{k2},....,L_{km})=A_b^{-1}\times\overline{A}_k$:

$$\overline{L}_3=\begin{pmatrix}1.25 & 3.125 & -3.125 & 0.625\\ -11.25 & 6.875 & 3.125 & -0.625\\ 8.75 & -8.125 & -1.875 & 4.375\\ 5.0 & -2.5 & 2.5 & -2.5\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}0.2\\0.2\\0.1\\0.1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0.625 & -0.625 & 0.375 & 0.5\end{pmatrix}^T$$

3. Визначаємо розв'язки:

$$\overline{u}_1=38.17-\frac{32.67}{0.375}\cdot 0.625=-16.28,\ \overline{u}_2=60.43-\frac{32.67}{0.375}\cdot(-0.625)=114.88$$

$$\overline{u}_3=\frac{32.67}{0.375}=87.12,\ \overline{u}_4=30.62-\frac{32.67}{0.375}\cdot 0.5=-12.94$$

Отримані розв'язки збігаються з розв'язками отриманими безпосередньо прямими обчисленнями. Вони вказують на суттєву зміну у функціонуванні допоміжного виробництва, зокрема, від'ємні показники вимагають зміни у структурі технологічних матриць як основного, так і допоміжного спектру галузей.

Висновки. Необхідність врахування екологічного фактору в сучасній системі подальшого розвитку цивілізації обумовлює актуальність розгляду виробничої діяльності суспільства в рамках єдиної соціо-еколого-економічної системи. При цьому важливою вимогою її існування є необхідність збалансування інтересів кожної з вказаних підсистем. Ефективним інструментом для цього слугують балансовий метод та відповідні розроблені на його основі моделі, зокрема запропонована в статті модель врахування витрат на реалізацію проектів скорочення емісій парникових газів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sustainable Innovation Forum, 2016. – [Elektronny resurs]. – Режим доступа: http://www.cop21paris.org

2. Onyshchenko, A. M., Lyashenko, I. M. (2010). Modeling material valuation sectoral structure in terms of limits on greenhouse gas emissions. Kyiv: Investments: practice and experience.

3. Kudin, V. I., Klyushin, D. A. (2003). Schemes decomposition of large-scale special matrix structure in modeling two-phase fluid filtration. Kyiv: Journal of Computational and Applied Mathematics.

4. Kudin, V. I., Lyashko, S. I., Kharytonenko, N. V., Yatsenko, J. P. (2007). Analysis of linear system properties by pseudoinverse matrices. Kyiv: Cybernetic and system analysis.